

УДК 004.07

doi:10.20998/2413-4295.2018.16.16

## ПОБУДОВА СЕНСОРНОЇ MESH-МЕРЕЖІ ПРОМИСЛОВОГО ІНТЕРНЕТУ РЕЧЕЙ НА ОСНОВІ ТЕХНОЛОГІЇ BLUETOOTH 4.2

Ю. Є. ГРУДЗИНСЬКИЙ\*, Я. Ю. ЛУКОМСЬКИЙ

кафедра автоматизації теплоенергетичних процесів Національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут ім. І. Сікорського", м. Київ, УКРАЇНА  
\*email: jug@sonettele.com

**АННОТАЦІЯ** У даній статті розглянуто особливості технології сенсорних mesh-мереж на базі технології Bluetooth Low Energy (BLE) для моніторингу об'єктів управління. Описана технологія BLE. Проаналізовано можливість використання Bluetooth як бази для mesh-мережі. Розглянуто варіанти ініціалізації вузлів мережі, а також, адресацію і передачу даних між ними. Розглянуто способи реалізації mesh-мережі з використанням Bluetooth. Наведено реалізацію простої мережі на прикладі моніторингу температури і вологості повітря в лікарні.

**Ключові слова:** бездротовий моніторинг; промислова система; сенсорні мережі; mesh-мережі; Bluetooth; BLE.

## BUILDING THE SENSORY MESH NETWORK OF IIoT BASED ON BLUETOOTH 4.2 TECHNOLOGY

YU. GRUDZYNSKYI\*, YA. LUKOMSKYI

Department Automation of heat-and-power engineering processes National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, UKRAINE

**ABSTRACT** This paper considered features of technology of sensory networks based on the BLE format for monitoring objects of management. BLE format is described. The possibility of using Bluetooth as the basis of the mesh topology network is analyzed. Options for initializing network nodes as well as addressing and transmitting data between them are considered. The ways of creating of Bluetooth mesh-network are considered. The main goal of this paper is to show, that there is technology, that can be used for creating low energy and secure mesh networks without complicated realization on existing routing protocols. There are three main solution directions of creating bluetooth mesh networks communication: standart, academic and proprietary. Academic is the most ordinary and simple. So if network require dynamic reorganization of nodes, for example cars on roads — flooding based or dynamic routing will be the most effective, and if all nodes won't be able to change its position like sensors in industrial manufacture — static routing solution will be exactly workable. The implementation of a simple network is illustrated by the example of monitoring the temperature and humidity in the hospital. As a result, we have easy implementational mesh topology network, built with the use of Bluetooth technology as the base. That also have Low Energy and high secure connection features along low price. Although there are no routing protocols created exactly for BLE — existing solutions can be integrated in implementations of similar systems. Also, description of the technology can give impuls to create an adapted communication protocol for routing between the nodes of the Bluetooth mesh network.

**Keywords:** wireless monitoring; industrial systems; sensor networks; mesh networks; Bluetooth; BLE.

### Вступ

У світі технологій триває гонка за перше місце в об'єднанні всіх оточуючих нас речей за допомогою протоколів бездротового зв'язку, головною особливістю яких є низьке енергоспоживання.

Mesh-мережі, або інакше сітчасті мережі, - це децентралізовані мережі, засновані на ряді пристроїв з'єднаних один з одним. Кожен з вузлів в них може виступати ретранслятором повідомлень інших вузлів. В основу покладена концепція ретрансляції повідомлень вузлами з метою розширення покриття мережі, при обмеженому радіусі дії кожного окремого вузла. Такий підхід дозволяє достатньо легко масштабувати діючу мережу при підключенні до неї нових вузлів – пристроїв.

### Мета статті

Метою статті є намагання показати можливість використання технології Bluetooth в якості базової при побудові сітчастих мереж всередині окремих будинків, або на невеликій території.

### Загальний огляд

Новий стандарт протоколу Bluetooth 4.2 побачив світ 3-го грудня 2014 року і встиг завоювати провідне місце в галузі безпроводних технологій. Він містить у собі три модернізації старого протоколу: безпечне з'єднання (Secure Connections), збільшення швидкості передачі даних за рахунок збільшеної довжини інформаційного пакета (Data Length

Extension, DLE) і захист конфіденційності (Privacy 1.2) [1]. Bluetooth 4.2 представив нові переваги, які покращують швидкість і безпеку передачі інформації, але найголовнішою перевагою є можливість використання Bluetooth, завдяки підтримки протоколу IPv6, для прямого доступу в Інтернет. Це ще більше розширює застосування Bluetooth при використанні його у якості протокола зв'язку для промислового Інтернету речей при моніторингу технологічних систем.

### Mesh-мережа

Протокол Bluetooth BLE підтримує не тільки з'єднання «point-to-point» (P2P), а й з'єднання «point-to-multipoint». При створенні мережі використовується архітектура Bluetooth-mesh, при якій кожен з вузлів може виступати ще й у якості ретранслятора пакетів іншого вузла, що суттєво збільшує площу, яку можна покрити одною бездротовою персональною мережею (WPAN), навіть при невеликому радіусі дії окремого вузла. На відміну від P2P, mesh-мережа дозволяє кожному пристрою взаємодіяти з будь-яким іншим пристроєм в мережі. Зв'язок здійснюється шляхом передачі повідомлень, а пристрої ці повідомлення можуть як передавати, так і ретранслювати іншим пристроям, таким чином, збільшуючи радіус зв'язку далеко за межі діапазону радіозв'язку кожного окремого вузла [2].

### Ініціалізація вузла мережі

Ініціалізація (provisioning) - це процес, за допомогою якого пристрій включається у mesh-мережу і стає її вузлом. Процес включає до себе кілька етапів, призводить до створення різних ключів безпеки і сам по собі є безпечним процесом. Ініціалізація здійснюється за допомогою програми на пристрої, такому, наприклад, як планшет. Прилад, що використовується для управління процесом ініціалізації, називається "Provisioner". Процес підготовки складається з п'яти кроків, описаних нижче.

1. "Я маяк" (Beaconing). Для підтримки різних функцій мережі bluetooth, були додані нові типи адвертайзінг профілю Bluetooth GAP (GAP AD), зокрема тип AD «Mesh Beacon». Непідготовлений пристрій вказує свою доступність в ефірі, використовуючи в пакетах адвертайзінг цей тип. Для того, щоб пристрій почав передавати такі дані, користувачеві може знадобитися примусово перевести його в цей режим, наприклад, натиснувши комбінацію кнопок або утримуючи спеціальну кнопку на пристрої протягом певного періоду часу.

2. Запрошення (Invitation). На цьому етапі пристрій, що використовується для управління процесом ініціалізації, надішле запрошення. Пристрій «Маяк», у відповідь на запрошення, відправляє інформацію про себе.

3. Обмін публічними ключами. Обидва пристрої

обмінюються своїми відкритими ключами або безпосередньо, або використовуючи метод OOB (out-of-band).

4. Аутентифікація. На цьому етапі пристрій, який повинен увійти в мережу, в тій чи іншій формі відображає користувачеві випадкове число. Користувач вводить це число в пристрій управління, після чого між двома пристроями відбувається певний обмін зашифрованими даними. Результатом даного обміну є обов'язкове підтвердження автентичності двох пристроїв.

5. Розсилка наданих даних. Після завершення перевірки автентичності створюється ключ сеансу, який використовується для забезпечення безпеки подальшого обміну даними, необхідними для завершення процесу ініціалізації, включаючи генерацію ключа безпеки «NetKey». Після завершення ініціалізації підготовлений пристрій стає володарем трьох речей:

- мережевого ключа «NetKey»;
- параметром безпеки мережі, що має назву «індекс IV» (IV Index);
- адресою unicast, виділеною пристроєм управління.

Після завершення п'ятого етапу пристрій стає вузлом мережі [3].

### Передача даних

Bluetooth використовує спосіб модуляції FHSS (Frequency-Hopping Spread Spectrum). Передавач розбиває пакети і передає їх по псевдовипадковому алгоритму стрибкоподібного перестроювання частоти (до 1600 разів в секунду), або шаблоном (pattern), складеним з 79 окремих частот. "Зрозуміти" один одного можуть тільки ті пристрої, які налаштовані на один і той же шаблон передачі - для сторонніх приладів передана інформація буде звичайним шумом [4].

Основним структурним елементом мережі Bluetooth є так звана "пікомережа" (piconet) - сукупність від 2 до 8 пристроїв, що працюють на одному і тому ж шаблоні. У кожній пікомережі один пристрій працює як master, а решта як slave. Master визначає шаблон, на якому будуть працювати всі slave-пристрої його пікомережі, і синхронізує її роботу. Стандарт Bluetooth передбачує з'єднання незалежних і навіть не синхронізованих між собою пікомереж (до 10) в так звану "scatternet". Для цього кожна пара пікомереж повинна мати як мінімум один спільний пристрій, який буде master'ом в одній і slave'ом в іншій пікомережі. Таким чином, в межах окремої scatternet з інтерфейсом Bluetooth може бути одночасно пов'язано максимум 71 пристрій, однак ніхто не обмежує застосування пристроїв-шлюзів, що використовують вже мережу Internet для більш далекого зв'язку [5].

Бездротова сенсорна мережа, складена з вузлів, які підтримують стандарт Bluetooth версії 4.2 має здатність до ретрансляції повідомлень по ланцюжку від одного вузла до іншого, що дозволяє в разі виходу

з ладу одного з вузлів організувати передачу інформації через сусідні вузли без значної втрати якості. Це, у свою чергу, підвищує живучість самої мережі при виході з ладу окремих вузлів. Сама мережа визначає оптимальний маршрут руху інформаційних потоків. Як вже було сказано, така мережа може бути організована як сукупність підмереж або кластерів, пов'язаних центрами збору інформації, що виконують роль шлюзів взаємодії «сенсорна мережа - FieldBus». Шлюзи є більш складні програмно-апаратні пристрої, ніж сенсори, володіють значними обчислювальними можливостями і підтримують стандартні інтерфейси (такі як Industrial Ethernet, GPRS, IEEE 802.11, CAN та RS-485). Центри збору інформації можуть мати у своєму розпорядженні виходи на дротові мережі, потужний радіопередавач і бути менш залежні від обмежень в енергоспоживанні [6].

### Bluetooth для IoT та mesh-мереж

Початково Bluetooth сфокусований на топологію "зірка", яка обмежує діапазон охоплення мережі. Для того, щоб впоратися з обмеженнями покриття мережі BLE, були запропоновані два основні підходи.

Перший з них базується на зменшенні пропускну здатності сигналу BLE на фізичному рівні щоб збільшити діапазон на каналному рівні. Однак ця схема все ще страждає від жорсткого обмеження покриття.

Другий підхід полягає у включенні BLE пристрою до mesh-мережі. Хоча ця модель передбачає складність і вимагає прибутності додаткових мережевих механізмів, вона дозволяє подолати обмеженість топології зірки.

Mesh-мережі на базі BLE можна реалізувати декількома способами (Рис. 1).

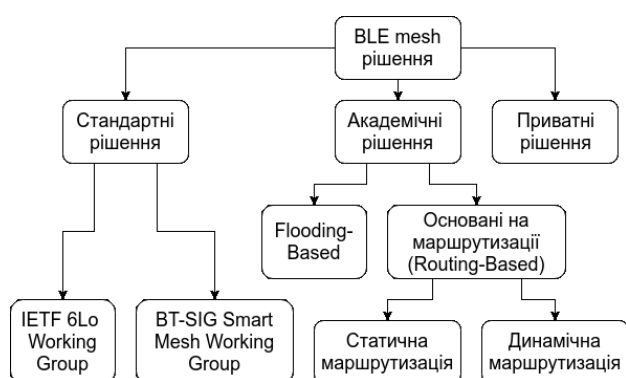


Рис. 1 – Рішення для BLE mesh-мереж

Рішення для BLE mesh-мереж:

1. Стандартні: BT-SIG Smart Mesh Working Group; IETF 6Lo Working Group;
2. Академічні: Flooding-based; Routing-based (static/dynamic);
3. Приватні рішення;

Стандартні рішення розроблені компаніями BT-SIG та IETF. Приватні (пропріетарні) рішення – розроблено окремими компаніями для власних цілей: CSRmesh, BLE-MESH.com, NXP, Silvair, Cypress, Estimote та інші.

Серед академічних рішень - Routing-based та Flooding-based.

Routing-based - рішення для організації вузлів в мережі з визначеними адресами і шляхами до вузлів. Flooding-based рішення для реалізації сітчастої мережі, яка потребує динамічну реорганізацію вузлів [7].

### Адресація Bluetooth пристроїв

Bluetooth пристрої використовують 48-розрядні адреси, які класифікуються як публічна адреса пристрою (Public Device Address) і випадкова адреса пристрою (Random Device Address), яка у свою чергу може бути статичною чи приватною.

Статична випадкова адреса попередньо програмується виробником на пристрої до його поставки, або це значення оновлюється при кожному циклі ввімкнення і вимкнення пристрою. Приватна випадкова адреса може бути двох типів: невизначена (Non-Resolvable Private Address - NRPA) і визначена (Resolvable Private Address - RPA). Невизначена генерується випадковим чином і змінюється при кожному новому з'єднанні.

Визначена адреса RPA становить основу конфіденційності BLE пристроїв. Ця адреса генерується за допомогою випадкового числа і загальнодоступного секретного ключа IRK. Ключ IRK, який використовується двома пристроями при їх поєднанні, зберігається у власній пам'яті пристрою під час з'єднання з іншим пристроєм [8].

### Адресація в mesh мережі

Основною характеристикою mesh мереж являється змінна топологія. Протоколи маршрутизації діляться на два класи:

1. Проактивні (табличні) - кожен вузол будує свою таблицю маршрутизації і ділиться інформацією про зміну топології мережі зі своїми сусідами. Наприклад OLSR, DSDV (Destination-Sequenced Distance Vector).

2. Реактивні (працюючі по запиті) - таблиці маршрутизації не будуються, маршрут створюється при необхідності - використовується ширококовна трансляція для визначення шляху надсилання повідомлення. Наприклад DSR (Dynamic Source Routing), AODV (Ad hoc On-demand Distance Vector) [9].

### Побудова mesh-мережі лікарні на базі технології BLE

Основні параметри, які повинні регулюватись в

лікарні - це температура і вологість в палатах. Отож маємо 5-ти поверхову будівлю по 10 кімнат на кожному поверсі. Всього 50 функціональних вузлів, які збирають інформацію. 5 центрів збору інформації та базова станція. Статична побудова мережі приводить до використання Routing-based рішення зі статичними 2-х байтними адресами вузлів і використанні проактивного протоколу маршрутизації OLSR.

OLSR заснований на механізмі ширококомовного розсилання для оновлення інформації про топологію мережі. Ця інформація відома кожному вузлу мережі. В OLSR вузол мережі відправляє так зване HELLO-повідомлення. Зміни в топології мережі вузли виявляють за допомогою прийнятих HELLO-повідомлень від сусідів. У цих повідомленнях міститься власна адреса вузла, що відправив дане повідомлення, а також перелік усіх його доступних сусідів і їх адреси. Таким чином вузол повідомляє своїм сусідам про доступні йому зв'язки. Кожен вузол зберігає у себе інформацію про своїх безпосередніх сусідів і сусідів "за два кроки". Відправка HELLO-повідомлень проводиться через встановлені проміжки часу. У разі, якщо протягом певного часу вузол не приймає HELLO-повідомлення від сусіда, то зв'язок з ним вважається розірваним. Відповідна зміна вноситься в таблицю топології мережі сусідів. Крім цього в мережі вузли періодично передають ширококомове ТС-повідомлення (topology control). У цьому повідомленні міститься інформація про з'єднання абонента з однокроковими сусідами. За отриманою інформацією з ТС і HELLO-повідомлень, вузол будує граф, який описує уявлення про побудову мережі для даного вузла. За допомогою цього графа будується таблиця найкоротших шляхів передачі інформації до кожного вузла [10].

### Обговорення результатів

Як результат маємо не складну в реалізації мережу сітчастої топології, побудовану з використанням технології Bluetooth 4.2 в якості базової. Хоча на даний момент конкретно адаптованих протоколів маршрутизації для реалізації mesh на основі Bluetooth не створено — існуючі варіанти при цьому можуть сміливо застосовуватись при впровадженні таких систем.

### Висновки

Bluetooth версії 4.2 завойовує собі місце у списку технологій здатних до реалізації mesh мереж. Крім цього дана версія володіє перевагами безпечної передачі даних та низьким енергоспоживанням. Отже, Bluetooth 4.2 може стати міцною основою для будь-яких сфер діяльності людини, де потрібно ввести дешеву, надійну і безпечну бездротову технологію передачі даних на невеликих площах (наприклад, в межах багатоповерхового будинку), або для створення

різного роду сенсорних мереж з використанням усіх їх переваг.

При використанні у промисловому інтернеті речей Bluetooth 4.2 може бути використаний при побудові дешевої високо захищеної сенсорної мережі невеликої площі для моніторингу технологічних процесів.

### Список літератури

1. **Соколов, М.** BLE v4.2: быстрее, безопаснее, энергоэффективнее. Часть 1. / **М. Соколов** // *Chip News Украина*. — 2017. — №4.
2. Bluetooth Core Specification, ver. 4.2, Bluetooth SIG, 2014.
3. **Ren, K.** Provisioning a Bluetooth Mesh Network Part 1 / **K. Ren**. — 2017. URL: <https://blog.bluetooth.com/provisioning-a-bluetooth-mesh-network-part-1>.
4. **Hossam, E. A.** Frequency Hopping Spread Spectrum Transceiver Implementation Using Floating-Point DSP / **E. A. Hossam, A. A. Zekry, A. E. Elhennawy, A. M. Hassan**. // *International Conference on Advanced Computer Theory and Engineering*. — 2009.
5. **Камшилин, А.** Bluetooth: технология и ее применение / **А. Камшилин**. — 2001. URL: <https://www.ixbt.com/mobile/review/bluetooth-2.shtml>.
6. **Грудзинський, Ю. Є.** Бездротовий моніторинг технологічних об'єктів управління на основі технології сенсорних мереж / **Ю. Є. Грудзинський, Я. Ю. Лукомський** // *Матеріали другої міжнародної конференції "Проблеми зняття з експлуатації об'єктів ядерної енергетики та відновлення навколишнього середовища" INUDECO'17* — 2017. — С. 95–99.
7. **Darroudi, S.M.** Bluetooth Low Energy Mesh Networks: A Survey / **S.M. Darroudi, C. Gomez** // *Sensors*. — 2017. — 17. — 1467. — doi: 10.3390/s17071467.
8. **Grace, K. H.** An approach for modestly directional communications in mobile ad hoc networks / **K. H. Grace, J. A. Stine, R. C. Durst** // *Springer Telecommun. Sys. J.* — 2005. — 28, 3-4. — 281-296. — doi: 10.1007/s11235-004-5573-0.
9. **Гусс, С. В.** Самоорганизующиеся mesh-сети для частного использования / **С. В. Гусс** // *МсuM*. — 2016. — №4 (40). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/samoorganizuyuschiysya-mesh-seti-dlya-chastnogo-ispolzovaniya>.
10. **Clausen, T.** Optimized Link State Routing Protocol (OLSR) / **T. Clausen, P. Jacquet, C. Adjih, A. Laouiti, P. Minet** // *Network Working Group*. — 2003.

### Bibliography (transliterated)

1. **Sokolov, M.** BLE v4.2: bystree, bezopasnee, energoeffektivnee. Chast 1. *Chip News Ukraina*, 2017, №4.
2. Bluetooth Core Specification, ver. 4.2, Bluetooth SIG, 2014.
3. **Ren, K.** Provisioning a Bluetooth Mesh Network Part 1. 2017. Available at: <https://blog.bluetooth.com/provisioning-a-bluetooth-mesh-network-part-1>.
4. **Hossam, E. A., Zekry, A. A., Elhennawy, A. E., Hassan, A. M.** Frequency Hopping Spread Spectrum Transceiver Implementation Using Floating-Point DSP. *International Conference on Advanced Computer Theory and Engineering*, 2009.
5. **Kamshilin, A.** Bluetooth: tekhnologiya i ee primeneniye. 2001, Available at: <https://www.ixbt.com/mobile/review/bluetooth-2.shtml>.



6. **Grudzinskiy, Yu. Ye., Lukomskyi, Ya. Yu.** Bezdrotoviy monitoring tekhnologichnikh ob'ektiv upravlinnya na osnovi tekhnologiyi sensornikh mrezh. *Materiali drugoyi mizhnarodnoyi konferentsiyi "Problemi znyattya z ekspluatatsiyi ob'ektiv yadernoyi energetiki ta vidnoblennya navkolishnogo seredovischa" INUDEC0'17*, 2017, 95–99.
7. **Darroudi, S. M., Gomez, C.** Bluetooth Low Energy Mesh Networks: A Survey. *Sensors*, 2017, **17**, 1467. – doi: 10.3390/s17071467.
8. **Grace, K. H., Stine, J. A., Durst, R. C.** An approach for modestly directional communications in mobile ad hoc networks. *Springer Telecommun. Sys. J.*, 2005, **28**, 3–4, 281–296. – doi: 10.1007/s11235-004-5573-0.
9. **Guss, S. V.** Samoorganizuyuschiesya mesh-seti dlya chastnogo ispolzovaniya. *MsiM*, 2016, №4 (40). Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/samoorganizuyuschiesya-mesh-seti-dlya-chastnogo-ispolzovaniya>.
10. **Clausen, T., Jacquet, P., Adjih, C., Laouiti, A., Minet, P.** Optimized Link State Routing Protocol (OLSR). *Network Working Group*, 2003.

#### Відомості про авторів (About authors)

**Грудзинський Юліан Євгенович** – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім.

І. Сікорського», старший викладач кафедри автоматизації теплоенергетичних процесів, м. Київ, Україна; e-mail: jug@sonettele.com.

**Yulian Grudzynskyy** – Senior Teacher, Department of Automation of Heat-Power Processes, National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Kyiv, Ukraine; e-mail: jug@sonettele.com.

**Лукомський Ярослав Юрійович** – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім.

І. Сікорського», магістр кафедри автоматизації теплоенергетичних процесів, м. Київ, Україна; e-mail: yar.lukomsky@gmail.com.

**Yaroslav Lukomskyi** – Master Student, Department of Automation of Heat-Power Processes, National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Kyiv, Ukraine; e-mail: yar.lukomsky@gmail.com.

*Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:*

**Грудзинський, Ю. Є.** Побудова сенсорної mesh-мережі промислового інтернету речей на основі технології Bluetooth 4.2 / **Ю. Є. Грудзинський, Я. Ю. Лукомський** // *Вісник НТУ «ХПІ», Серія: Нові рішення в сучасних технологіях*. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2018. – № 16 (1292). – С. 107-111. – doi:10.20998/2413-4295.2018.16.16.

*Please cite this article as:*

**Grudzynskyy, Yu., Lukomskyi, Ya.** Building the sensory mesh network of IIoT based on Bluetooth 4.2 technology. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies*. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2018, **16** (1292), 107-111, doi:10.20998/2413-4295.2018.16.16.

*Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:*

**Грудзинский, Ю. Е.** Построение сенсорной mesh-сети промышленного интернета вещей на основе технологии Bluetooth 4.2 / **Ю. Е. Грудзинский, Я. Ю. Лукомский** // *Вестник НТУ «ХПИ», Серія: Новые решения в современных технологиях*. – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2018. – № 16 (1292). – С. 107-111. – doi:10.20998/2413-4295.2018.16.16.

**АННОТАЦИЯ** В данной статье рассмотрены особенности технологии сенсорных mesh-сетей на базе технологии Bluetooth Low Energy (BLE) для мониторинга объектов управления. Описана технология BLE. Проанализирована возможность использования Bluetooth в качестве базы для mesh-сети. Рассмотрены варианты инициализации узлов сети, а также адресация и передачу данных между узлами. Рассмотрены способы реализации mesh-сети с использованием Bluetooth. Показана реализация простой сети на примере мониторинга температуры и влажности воздуха в больнице.

**Ключевые слова:** беспроводной мониторинг; промышленная система; сенсорные сети; mesh-сети; Bluetooth; BLE.

*Поступила (received) 07.05.2018*